

УДК 629.7.036 : 539.4

Н.Н. КОСТИН, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ПРОЧНОСТЬ РОТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАССОЕДИНЕНИИ ВАЛОВ

В работе проанализированы результаты расчетов методом конечных элементов ротора турбины на различных частотах вращения. Показано, что для роторов новых авиационных двигателей испытания на прочность на частоте вращения раскрутки ротора турбины при рассоединении или разрушении валов можно оценивать расчетно-экспериментальным методом, с учетом проведенных испытаний на двигателях-прототипах.

авиационные двигатели, испытания на прочность, ротор, статор, вал, запасы прочности, деформация

Введение

Для обеспечения безопасности полетов самолетов и вертолетов проводятся специальные проверки авиационных двигателей. При этом особое внимание обращается на испытания по проверке прочности деталей и узлов двигателей. Одним из случаев, для которого требуется проведение испытания, является разрушение валов или их расщепление. Конструкция двигателя должна быть такой, чтобы разрушение валов не приводило к опасным последствиям для самолета [1].

Опасные последствия могут возникать вследствие снятия нагрузки с турбины и последующей ее раскрутки.

В подавляющем числе случаев возможного разрушения вала раскрутка турбины сопровождается ее осевым перемещением (нарушение баланса осевых сил на роторе), что приводит к торможению ротора о статор и прекращению дальнейшей раскрутки. Таким образом, предотвращаются отказы с опасными последствиями.

В настоящей статье рассматривается тот очень редкий случай, когда после разрушения вала ротор турбины с валом остаются на своих опорах (в том числе шариковом подшипнике) и осевого перемещения не происходит.

Для того чтобы избежать опасных последствий, в этом случае на практике используют несколько направлений конструирования авиационных ГТД:

1) обеспечиваются запасы прочности и конструктивное исполнение соответствующего небольшого участка вала таким образом, что разрушение вала в этом месте становится практически невероятным (вероятность $p < 10^{-9}$);

2) ранжирование запасов в деталях турбины (лопатки и диски) и применение для изготовления рабочих лопаток высокопластичных материалов, при этом несколько усиливая конструкцию корпусов;

3) постановка системы защиты от раскрутки ротора;

4) обеспечиваются достаточные запасы прочности в дисках турбины на частоте вращения раскрутки и другие.

Обеспечение достаточных запасов прочности в дисках турбины на частоте вращения раскрутки возможно осуществить расчетным путем с использованием проведенных ранее экспериментальных работ по рассоединению валов на двигателях-прототипах.

Для этого необходимо иметь критерии оценки результатов испытаний двигателя-прототипа относительно нового рассматриваемого двигателя.

В работе показана возможность замены испытаний ротора турбины на частоте вращения раскрутки после разрушения вала нового авиационного двигателя расчетно-экспериментальными исследованиями.

1. Формулирование проблемы

Для обеспечения отсутствия отказов с опасными последствиями расчетным путем при использовании опыта экспериментального рассоединения валов на двигателях-прототипах необходимо иметь критерии обеспечения безопасности.

Обеспечение безопасности при раскрутке турбины заключается в следующем:

- 1) сохранение при раскрутке достаточных запасов прочности дисков;
- 2) недопущение массового вылета («десантирования») рабочих лопаток из пазов дисков.

Сравнение двигателей-прототипов при стендовых испытаниях и вновь создаваемого двигателя согласно выбранным вышеприведенным критериям позволит сделать вывод о достаточном обеспечении уровня безопасности.

Существенным преимуществом такого метода определения соответствия является возможность учета минимальных свойств дисков, влияние технологии изготовления, допусков и прочее.

Испытания с принудительной разрезкой валов проводятся на двигателе. При этом разрушается вал и ротор турбины раскручивается до определенной частоты вращения. Конструкция двигателей при этом должна обеспечивать эффективное торможение ротора с отсутствием опасных последствий для самолета.

Для этого не должно быть разрушения дисков или значительной вытяжки ободной части дисков, что может привести к «десанту лопаток» или другим опасным последствиям. При «десанте лопаток» большое количество лопаток вылетает из зам-

ковой части диска и они могут пробить корпус двигателя.

Для обеспечения отсутствия опасных последствий после разрушения вала диски должны обладать достаточной прочностью на частоте вращения раскрутки ротора турбины, и не иметь значительных деформаций.

В данной статье выполнен анализ увеличения вытяжки дисков при значительном увеличении частоты вращения для определения максимальной допустимой частоты, до которой может раскручиваться ротор.

2. Решение проблемы

По нашему мнению, критерием, обеспечивающим отсутствие опасных последствий при рассоединении вала и раскрутке турбины, может служить вытяжка (увеличение радиальных размеров) дисков турбины.

Такой выбор обусловлен тем обстоятельством, что вытяжка дисков характеризует как запас прочности диска (относительная деформация), так и возможность мгновенного «десантирования» рабочих лопаток.

Для исследования изменения перемещений в ободной части дисков при значительном увеличении частоты вращения ротора турбины относительно максимальной допустимой в эксплуатации был выбран один из спроектированных на ГП «Ивченко-Прогресс» двигателей с высокой степенью двухконтурности.

Для анализа вытяжки дисков при увеличении частоты вращения выполнены расчеты методом конечных элементов деталей ротора турбины вентилятора (ТВ). Расчеты по определению напряженно-деформированного состояния в деталях ротора ТВ выполнены в упругой и упругопластической областях.

Сетка конечных элементов состояла из 20565 узлов и 17816 элементов.

Расчетная схема включила диски ТВ, кольца лабиринтные и вал ТВ. Между ними заданы условия совместных перемещений в осевом направлении и на радиусе расположения болтов – в радиальном направлении.

На валу ТВ со стороны подшипника задано нулевое осевое перемещение.

Материал указанных выше деталей – сплав ЭИ698-ВД.

Центробежная сила от рабочих лопаток приложена в виде контурной нагрузки в ободных частях дисков ТВ.

На поверхностях деталей заданы значения давлений в тракте и полостях системы охлаждения ротора ТВ, полученные из гидродинамического и гидравлического расчетов.

Результаты расчетов ротора ТВ (эквивалентные напряжения) при максимальной допустимой в эксплуатации частоте вращения приведены на рис. 1.

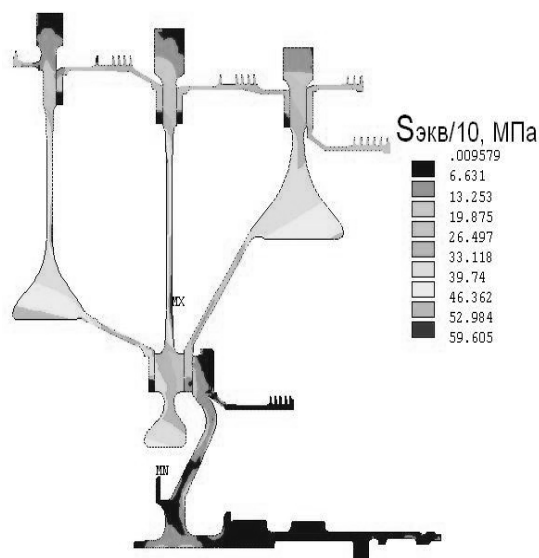


Рис. 1. Эквивалентные напряжения в деталях ротора ТВ

На рис. 2 приведена динамика изменения вытяжки ободной части диска 3 ступени ТВ, полученная в результате расчетов методом конечных элементов

на различных частотах вращения в упругой и упругопластической областях, начиная с максимальной допустимой в эксплуатации. При этом [2]

$$u_{r\text{пл}} = u_r - u_{r\text{упр}}, \quad (1)$$

где $u_{r\text{пл}}$ – вытяжка в ободной части диска;

u_r – суммарные радиальные перемещения в ободной части диска, полученные из расчетов в упругопластической области;

$u_{r\text{упр}}$ – радиальные перемещения в ободной части диска, полученные из расчетов в упругой области.

Диск 3 ступени выбран из-за максимальных по величине остаточных деформаций в ободной части по сравнению с другими дисками ТВ на одинаковой частоте вращения.

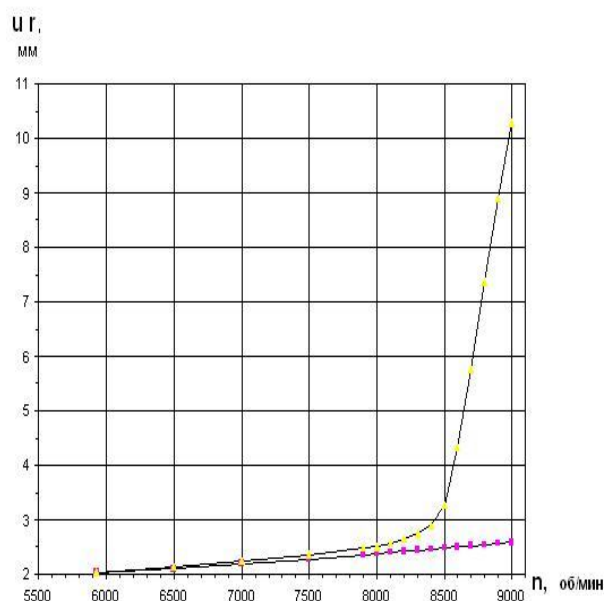


Рис. 2. Динамика изменения перемещений ободной части диска 3 ступени ТВ

Как видим, начиная с некоторой частоты вращения незначительное ее увеличение (на 50...100 об/мин) приводит к существенному увеличению вытяжки диска (на рис. 2 это соответствует приблизительно 8700...8800 об/мин). При этом диск еще имеет достаточные запасы прочности, чтобы не разрушиться, поскольку остаточное относительное уд-

линение δ находится еще на уровне 1,21...1,81% (для материала ЭИ698-ВД минимальное значение δ составляет более 17%). Поэтому, предлагается взять такую частоту вращения в качестве максимальной допустимой частоты вращения, до которой можно допускать раскрутку ротора после разрушения вала. Следует учесть, что эта величина принята с некоторым запасом по частоте вращения и при этом отсутствуют опасные последствия для самолета.

На предприятии ГП «Ивченко-Прогресс» проведен ряд успешных испытаний по принудительному рассоединению валов на двигателях с высокой степенью двухконтурности. Такие испытания можно использовать для расчетно-экспериментального анализа конструкции новых двигателей.

Для определения величины раскрутки роторов нового двигателя следует учитывать конструкцию, геометрические характеристики и массовые моменты инерции деталей роторов, параметры нового двигателя в сравнении с параметрами испытанного двигателя и результаты испытаний серийных двигателей с принудительным рассоединением валов.

На новом двигателе при определенной частоте вращения раскрутки должны быть достаточные запасы прочности наиболее нагруженных деталей роторов (дисков) и при этом вытяжка дисков не должна превосходить допустимую. Такие результаты будут получены с достаточным запасом, если частота вращения раскрутки не превысит частоты вращения

ротора, при которой начинается значительная вытяжка ободных частей дисков.

Выводы

Обеспечение отсутствия опасных последствий при рассоединении валов роторов авиационных ГТД может быть обеспечено расчетно-экспериментальным способом, на основании проведенных испытаний на двигателях-прототипах и сравнительного конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния дисков ротора турбины.

При этом в качестве главного критерия может быть использована вытяжка дисков при раскрутке.

Литература

1. Авиационные правила. Ч. 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. // Межгосударственный Авиационный Комитет. – 2003. – С. 11-16.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 342 с.

Поступила в редакцию 27.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.